

# 고온초전도 회전계자형 동기전동기의 3차원 동특성해석

이 상 진  
위덕대학교 전기공학과

## Three Dimensional Dynamic Analysis of High-Tc Superconducting Revolving Field Type Synchronous Motor

Sang-Jin Lee

Dept. of Elec. Eng., UIDUK Univ.

### abstract

One of the most important aspect in developing High-Tc Superconducting Synchronous Motor is producing high-Tc superconducting tapes that withstand the amount of currents that is needed to run the motor with stability. The purpose of this paper is to find the magnetic field distribution inside the motor in order to find out if the high-Tc superconducting tapes operate stably in actual motor operation. With this goal, magnetic field distribution in a detailed model of the actual motor was analyzed through F.E.M. By analyzing the field distribution acquired through the computer simulation, it has been observed whether the high-Tc superconducting tape maintains its superconductivity in actual motor operation. Also, the effects of the flux damper on the motor's operational characteristics and the magnetic field distribution have been analyzed.

As a result, it has been proved that the high-Tc superconducting tapes can withstand 600 A·turns which is required by the previous simulation aimed at developing this motor.

It has also seen that the flux damper reduces armature reactance during the motor operation and change of load, helping the stable motor operation.

### 1. 서론

고온 초전도체는 액체 질소를 이용한다는 점에서 응용에 대한 가능성을 풍부하게 내포하고 있다. 그 중 고온초전도 전동기의 개발은 시스템의 운용비 절감 및 미래의 광범위한 초전도 응용에 대한 기초연구가 된다<sup>1)</sup>.

DC를 요구하는 계자권선에 고온 초전도체를 사용하는 고온초전도 계자형 동기전동기는 21세기 에너지 절약 상품으로서, 전동기의 효율을 향상시키기 위하여 이에 대한 연구가 매우 시급한 실정이다. 고온초전도 전동기는 고온초전도체를 이용한 응용기기 중 그 응용 가능성이 가장 먼저 확인되어 기초연구에 착수하였으며, 이것은 1987년 고온초전도체의 출현과 더불어 이루어 졌다.

본 논문에서는 고온초전도 동기전동기의 운전 중에 계자권선으로 사용되는 고온초전도 테이프 선재가 안정적으로 동작하는지를 알아보기 위하여 전동기 내부의 자계분포를 구하였다. 이를 위하여 이미 실험 제작된 고온초전도 동기전동기의 구조 및 각 부분의 재질을 정확히 파악하여 해석가능한 모델을 설정하였고, 이렇게 만들어진 모델에 3차원 유한요소법을 적용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 자계분포를 분석하여 고온초전도 테이프 선재가 전동기의 운전 중에 초전도상태로 안정하게 유지되는지를 확인하였으며, 또한 액체질소 용기를 형성하는 플럭스 댐퍼(flux damper)가 초전도 선재의 자계분포 및 전동기의 동작특성에 미치는 영향 등을 알아보았다.

## 2. 본론

### 2.1 고온초전도 동기전동기의 구조

기존에 실험 제작된 고온초전도 동기전동기는 그림 1과 같이 전기자는 일반 동기전동기와 같은 규소강판으로 적층하고 그 내부에 슬롯을 만들어 구리 권선을 넣은 구조를 갖는다. 회전자는 그림 2와 같이 4극으로 외측부터 열절연 및 시변자계의 차단을 위해 1mm 두께의 SUS판과 2mm 두께의 동판을 진공층을 사이에 두고 위치시켰다. 그리고 액체 질소가 유입되어 고온초전도 테이프 선재를 초전도상태로 유지하면서 동시에 여자코일을 지지할 수 있도록 회전자 중심에 벌크 형태의 철심을 위치시켰다. 이 철심의 중심에는 지름 24 mm 크기의 질소 유로가 위치하고 있으며, 이 유로를 통하여 액체질소가 회전자 내부로 유입된다. 하우징을 포함한 전체 외경은 290 mm 이며, 고정자 외경은 190 mm, 내경은 120 mm이다.

선재의 크기는 가로 11.8 mm, 세로 17.9 mm 인데, 이것은 가로 0.25 mm, 세로 2.5 mm 인 테이프 선재를 600 A·T의 여자 전류를 흘릴 수 있도록 감은 것이다. 전기자는 3상 Y결선으로 각 상의 정격전압은 220V이다. 또한 2층 중권의 형태를 취하고 있으며, 슬롯의 수는 48, 권선피치는 11이며 각 슬롯당 도체수는 132 개이다.

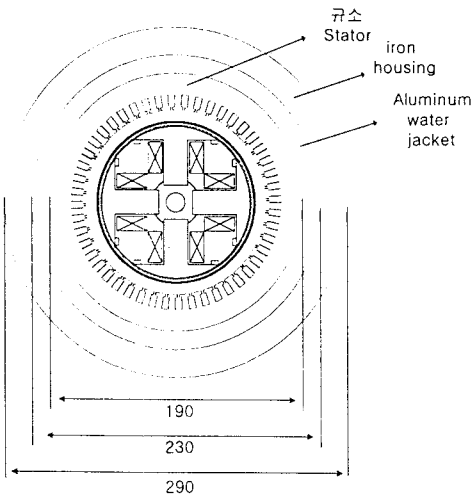


그림 1. 고온초전도 동기전동기의 구조

Fig. 1. Structure of the high-Tc superconducting synchronous motor

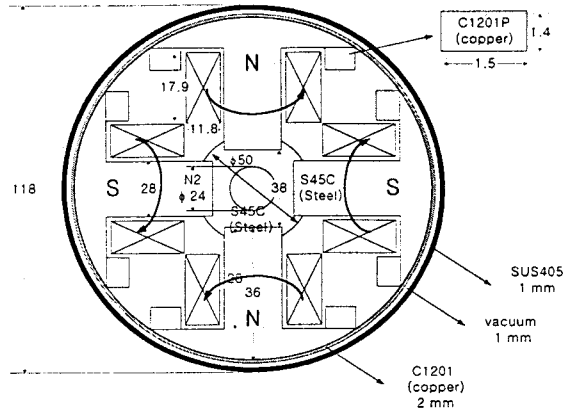


그림 2. 회전자를 단면으로 자른 모습

Fig. 2. Cross section of the rotor

### 2.2 모델설정 및 컴퓨터 시뮬레이션

그림 3은 컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 영국 Vector Fields사의 3차원 유한요소법 프로그램인 OPERA-3d를 이용하여 제작된 초전도전동기 해석용 모델이다. 축방향으로 대칭이므로 전체의 1/2만을, 반지름 방향으로서는 회전을 고려하여 전체를 모델링하였다<sup>2)</sup>. 사용된 재료의 방향성은 고려하지 않았으며, 전도도는 전기자의 경우 300K에서, 회전자의 경우에는 77K에서의 값을 이용하였다. 철의 경우 자기 이력 곡선을 이용한 비선형 해석을 수행하였다.

부하가 무부하, 250 W, 그리고 500 W일 때 실험에서 측정된 전기자 권선에서의 전류 값을 이용하여 전동기의 자계분포를 해석하였다.

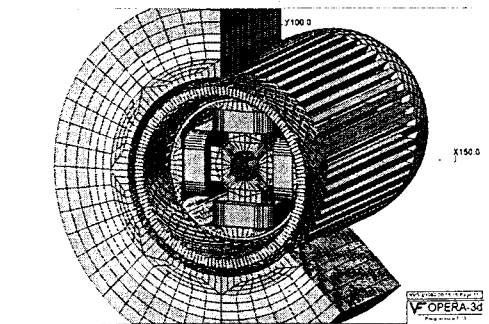


그림 3. 시뮬레이션에 사용된 전동기의 모델

Fig. 3. Model of the motor used in the simulation

## 2.3 결과 및 고찰

### 2.3.1 전동기 내부에서의 자장분포

부하를 각각 무부하, 250 W, 500 W로 변화시키면서 플럭스 댐퍼가 있을 때와 없을 때의 자장분포를 비교하였다. 그림 4는 부하가 250 W, 플럭스 댐퍼가 있는 경우 전동기 내부에서의 자장 분포를 나타낸다. 자장이 가장 큰 곳은 그림에서 자기력선들이 밀집되어 있는 곳으로, 자극의 가장자리에서 그 값이 최대가 된다. 각각의 부하에 해당하는 부하각으로 인해 자장의 흐름이 바뀌는 것도 확인할 수 있었다. 각각의 부하각은 무부하, 250 W, 500 W일 때 각각 0, 20, 30도로 설정하였다.

플럭스 댐퍼는 공극에서 누설자속 의한 고온초전도 테이프 선재의 특성 약화를 막기 위한 것 이외에도, 회전자 내부로 유입되는 질소를 회전자에 담아 놓는 용기 역할을 하며, 또한 전기자 반작용을 감소시켜 부하변동 또는 과도상태 때 안정적인 전동기 동작을 유지 시켜주는 역할을 담당한다. 이는 시뮬레이션 결과에서 플럭스 댐퍼가 있는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하여 확인할 수 있었다. 없는 경우의 자장이 더 왼쪽으로 치우치는데, 이것은 플럭스 댐퍼가 자극에서 나온 자장이 전기자의 자장을 따라가는 것을 도와주는 역할을 해 준다는 뜻이 된다.

한편 시뮬레이션을 통하여 플럭스 댐퍼에서 자속 변화에 의한 손실이 발생한다는 사실도 확인할 수 있었다. 이것은 플럭스 댐퍼가 있는 경우와 없는 경우 자장의 크기를 비교했을 때 플럭스 댐퍼가 없을 때 그 값이 크게 나왔다는 사실로부터 알 수 있다. 무부하, 250 W, 500 W일 때 자장의 최대값은 각각 398.04 Gauss, 1501.44 Gauss, 4549.31 Gauss 씩 플럭스 댐퍼의 유무에 따라 차이가 발생하였다.

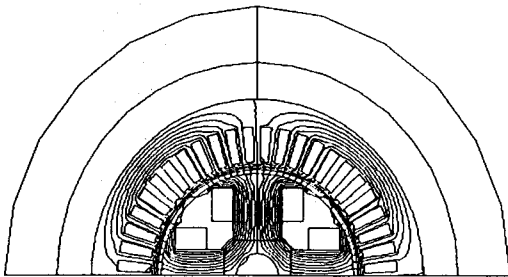


그림 4. 부하가 250 W일 때의 자장분포  
Fig. 4. Magnetic field distribution at 250 W load

### 2.3.2 공극에서의 자장분포

그림 5는 0도부터 180도 까지 공극에서의 자속밀도를 그래프로 나타낸 것이다. 공극 자장의 최대값은 자극 중심에서 대략 0.14 T 정도이다. 이 값은 플럭스 댐퍼가 있을 때는 부하변동에 따라 영향을 받지 않는 것으로 보이며, 플럭스 댐퍼의 영향 때문에 부하각에 따른 공극에서의 자장 크기도 부하변동에 따라 조금 밖에 증가하지 않았다. 그러나, 플럭스 댐퍼가 없을 때는 부하각에 따라 많은 영향을 받을 수 있었다. 250 W와 500 W일 때 플럭스 댐퍼가 없는 경우의 공극 최대값은 각각 0.16 T와 0.185 T로 많이 증가하였다. 이는 플럭스 댐퍼에서 손실이 생긴다는 것을 증명하는 것이다<sup>3)</sup>.

또한 그래프들을 살펴보면, 플럭스 댐퍼가 있는 경우, 자장이 가운데 자극을 중심으로 대칭으로 분포한다는 것을 알 수 있다. 이것은 전동기가 안정적으로 운전중임을 보여주는 것이다. 그러나 플럭스 댐퍼가 없는 경우에는 부하각에 따라 그 분포가 자극을 중심으로 대칭을 이루지 않는 것을 볼 수 있다. 부하각이 0도인 무부하에서는 플럭스 댐퍼가 없더라도 파형에 많은 변화는 없었으나, 부하각이 20도인 250 W와 부하각이 30도인 500 W일 때는 파형이 많이 일그러져 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 또한, 이러한 현상은 250 W의 경우보다 부하각이 큰 500 W의 경우에서 더욱 심각하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

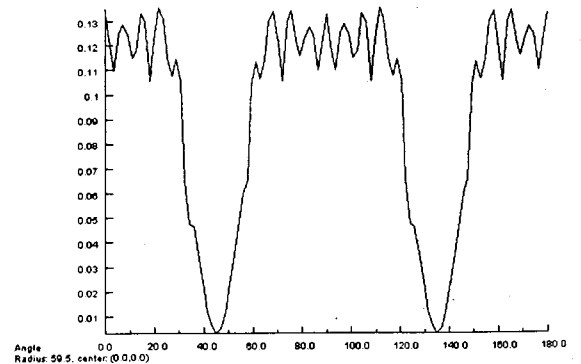


그림 5. 250 W 부하일 때 공극에서의 자계분포  
Fig. 5. Air gap magnetic field at 250 W load

### 2.3.3 초전도선재에서의 자장분포

그림 7은 전동기 오른쪽 상단에 위치한 사각형 모양의 선재 가장자리에서의 자장분포를 나타낸 것이다. 선재에서의 자장 측정 위치는 그림 6에 표시하였다. 자장이 가장 큰 곳에서의 값은 대략 0.075 T 정도이며, 부하변동에 따른 변화는 보이지 않았지만, 플럭스 댐퍼가 없는 경우에는 최대값이 0.08 T 정도로 증가하였다.

유한요소법을 이용한 고온초전도 동기전동기의 자계분포 결과에 따라 고온초전도 테이프 선재에 미치는 자장의 최대값이 0.08 T라는 결과를 얻게 되었다. 이는 회전자에 위치한 고온초전도 테이프 선재의 특성곡선을 참고하여 본다면, 전동기 설계시 회전자 축의 한 자극에서 확보해야 하는 600A·turns를 발생시킬 수 있는 여자전류 값인 4 A를 충분히 흘릴 수 있음을 알 수 있다<sup>4)</sup>.

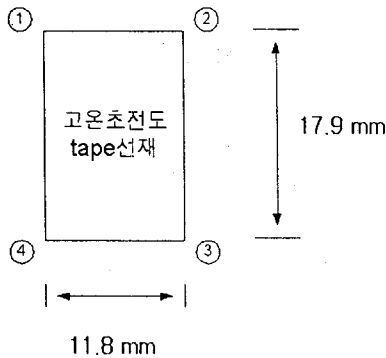


그림 6. 선재에서의 자장측정 위치

Fig. 6. Location of magnetic field measurements on the superconducting tape

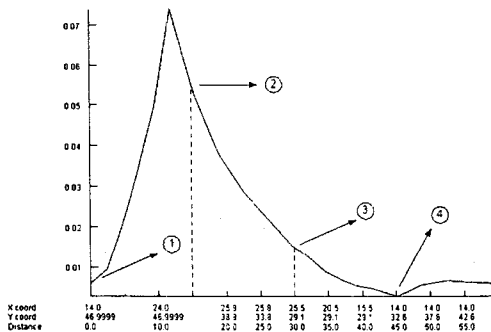


그림 7. 250 W 부하인 경우 선재에서의 자장분포  
Fig. 7. Magnetic field distribution of the superconducting tape at 250 W load

### 3. 결론

본 논문에서는 고온초전도 동기전동기의 운전 중에 계자권선으로 사용되는 고온초전도 테이프 선재가 안정적으로 동작하는지를 알아보기 위하여 전동기 내부에서의 자계분포를 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

유한요소법을 이용한 고온초전도 동기전동기의 내부 자계분포 결과에 따라 고온초전도 테이프 선재에 미치는 자장의 최대값이 0.08 T라는 결과를 얻게 되었다. 이는 회전자에 위치한 고온초전도 테이프 선재의 특성곡선을 참고한다면, 전동기 설계시 회전자 축의 한 자극에서 확보해야 하는 600A·Turns를 발생시킬 수 있는 여자전류 값인 4 A를 충분히 흘릴 수 있음을 의미한다.

무부하, 250 W, 500 W인 경우 고온초전도 동기전동기의 내부 자계분포 해석에 있어서, 회전자 외부에 위치한 플럭스 댐퍼의 역할은 이것이 없는 경우와 비교하여 부하변동 또는 과도상태 때에 전기자 반작용을 감소시키는 역할을 하여 안정적인 전동기 동작을 도와주는 것을 알 수 있었다. 그러나 전동기의 전체 자계회로 측면에서 본다면 플럭스 댐퍼 쪽으로 누설자속이 발생하여 전동기의 출력을 약간 감소시킨다는 사실을 알 수 있었다.

### 4. 참고문헌

- [1] J. R. Bumby, Superconducting Rotating Electrical Machines, Oxford University Press, New York, 1983
- [2] Vector Fields Ltd., PC-OPERA Reference Manual, 1997
- [3] W. J. Carr, Jr, AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors, Gordon and Breach Science Publishers, New York, pp 128-130, 1993
- [4] M. Sugimoto, A. Kimura, M. Mimura and Y. Tanaka, "Electromagnetic interfilament coupling of silver sheathed Bi-2223 multi-filamentary tapes in transverse AC magnetic fields", Physica C 279 pp 225-232, 1996